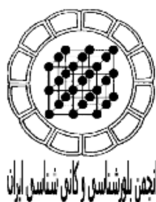
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و سوم، شمارهٔ دوم، تابستان ۹۴، از صفحهٔ ۲۵۷ تا ۲۶۸



شیمیِ کانی‌ها و دما-فشارسنجی بازالت‌های سلطان میدان، شمال شاهرود

مرتضی درخشی*[۱]، حبیب الله قاسمی[۱]، فاتما توکسوی کوکسال[۲]

۱- دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

۲- گروه مهندسی زمین شناسی، دانشگاه فنی خاورمیانه، آنکارا، ترکیه

(دریافت مقاله: ۹۳/۱/۱۶، نسخه نهایی: ۹۳/۴/۴)

چکیده: مجموعه‌ی بازالتی سلطان میدان شامل دنباله‌ی ضخیمی از گدازه‌های بازالتی همراه با برخی میان لایه‌های نازک رسوبی است که در گستره‌ی شمال غرب تا شمال شرق شاهرود رخنمون دارد. سنگ‌های بازالتی سلطان میدان از ماگمایی با ماهیت انتقالی تا قلیایی و ذوب بخشی ۱۴ تا ۲۰ درصدی خاستگاه گوشته‌ای غنی‌شده‌ی گارنت‌پریدوتیتی و در جایگاه کافت درون قاره‌ای طی اردوویسین پسین- ابتدای سیلورین پسین شکل گرفته‌اند. این سنگ‌های بازالتی از ترکیب کانی‌شناسی نسبتاً یکنواختی برخوردار بوده و دستخوش دگرسانی با درجات متوسط تا شدید شده‌اند. پلاژیوکلازِ لابرادوریتی و کلینوپیروکسن اوژیتی کانی‌های اصلی، و اکسیدهای آهن-تیتان از نوع تیتانومگنتیت، و ایلمنیت کانی‌های فرعی را در این سنگ‌ها تشکیل می‌دهند. نتایج دما-فشارسنجی روی کلینوپیروکسن‌ها نشانگرِ دمای تبلور بین حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد، فشار کمتر از ۶ کیلوبار و تبلور در آشیانه‌ی آشیانه‌های ماگمایی واقع در اعماق کمتر از ۲۳ کیلومتری است.

واژه‌های کلیدی: *شیمی کانی‌ها؛ دما-فشارسنجی؛ بازالت‌های سلطان میدان؛ شاهرود.*

مقدمه

مجموعه‌ی بازالتی سلطان میدان (SMBC) شامل دنباله‌ی ضخیمی از روانه‌های متعدد گدازه‌ی بازالتی، آگلومرای بازالتی و توف همراه با برخی میان لایه‌های نازک رسوبی است که رخنمون‌های پراکنده‌ی آن در گستره‌ی گسترده‌ای از شمال غرب تا شمال شرق شاهرود گسترش دارند (شکل ۱). علیرغم اینکه عموماً در منابع مختلف سنِ تشکیل مجموعه‌ی بازالتی سلطان میدان به سیلورین نسبت داده شده است، اما بررسی‌های جدید نشان داد که این مجموعه طی اردوویسین پسین- آغاز سیلورین پسین [۲،۱] شکل گرفته است. همچنین بررسی ویژگی‌های ماگمایی در این بازالت‌ها بیانگر ماهیت انتقالی تا قلیاییِ ماگمای اولیه، ارتباط زایشی سنگ‌های این مجموعه از طریق فرآیند تبلور جدایشی، عدم تأثیر و یا نقش ناچیز آلایش ماگمایی، و شکل‌گیری ماگمای اولیه از ذوب بخشی ۱۴ تا ۲۰ درصدیِ خاستگاه گوشته‌ای غنی‌شده‌ی گارنت‌پریدوتیتی در محیط کششی کافت درون قاره‌ای است [۱]. تشکیل این مجموعه‌ی بزرگ بازالتی را باید در ارتباط با مراحل کافت‌زایی پالئوتتیس دانست [۱-۷].

با وجود بررسی‌های متعدد روی ویژگی‌های مختلفِ بازالت‌های سلطان میدان، این اولین بررسی روی شیمیِ کانی‌های تشکیل دهنده‌ی این بازالت‌ها با استفاده از ریزپردازش الکترونی است. به همین دلیل، نخست ترکیب شیمیایی و تغییرات ترکیبی کانی‌های تشکیل دهنده‌ی بازالت‌های منطقه‌ی مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه با استفاده از دما- فشار سنج‌های پیروکسنی، به بررسی شرایط دما و فشار تشکیل آن‌ها پرداخته شده است.

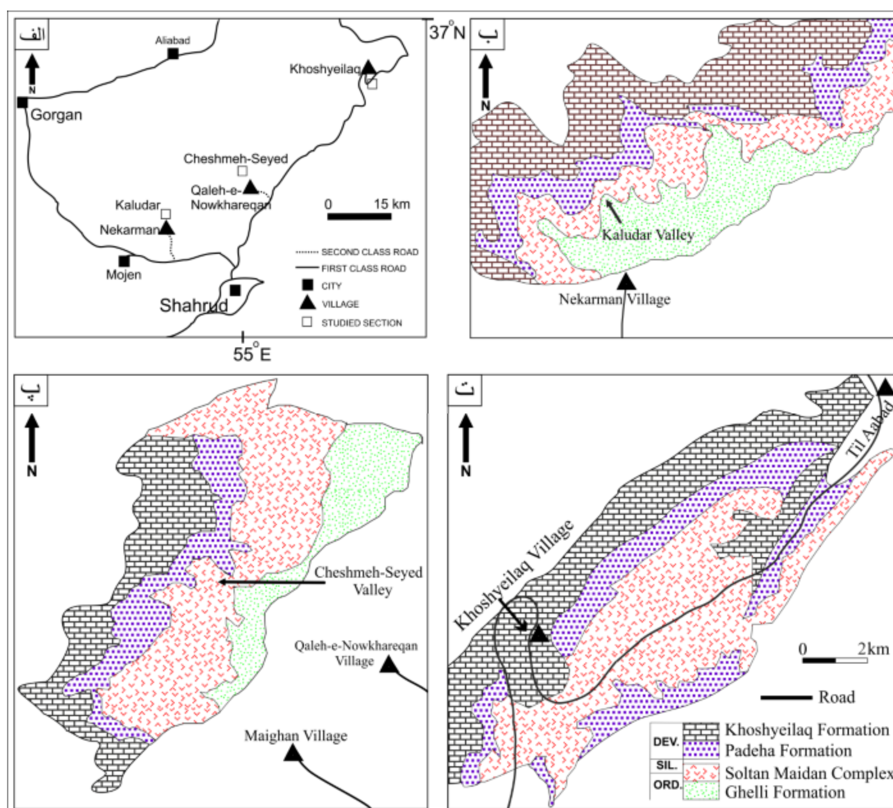
*نویسنده مسئول، تلفن - نمابر: ۰۲۷۳(۳۳۹۶۰۰۷)، پست الکترونیکی: mortezaderakhshi78@yahoo.com

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

منطقه‌ی مورد بررسی با روند شمال شرقی-جنوب غربی در بخش شرقی رشته کوه‌های البرز و در مختصات جغرافیایی ″۱۰ ′۴۰ °۵۴ تا ″۱۲ ′۲۹ °۵۵ طول شرقی و ″۱۲ ′۲۶ °۳۶ تا ″۰۷ ′۵۵ °۳۶ عرض شمالی قرار گرفته است. در این پژوهش، با توجه به گستردگی و ضخامت زیاد مجموعه‌ی بازالتی سلطان میدان، سه رخنمون مناسب و اصلی از این مجموعه در نزدیکی روستاهای نکارمن (در دره‌ی کلودر)، قلعه‌نو خرقان (در دره‌ی چشمه‌سید) و خوش‌ییلاق انتخاب و مورد بررسی دقیق قرار گرفته‌اند (شکل ۱). شواهد صحرایی نشان می‌دهند که ضخامت این مجموعه‌ی بزرگ بازالتی در دره‌ی کلودر ۴۳۶ متر، در دره‌ی چشمه‌سید ۱۲۸۶ متر، و در منطقه‌ی خوش‌ییلاق حداقل ۸۸۰ متر است [۲،۱]. در تمامی این رخنمون‌ها میان لایه‌های نازکی از سنگ‌های رسوبی شامل شیل، سیلتستون، ماسه‌سنگ و کنگلومرا حضور دارند.

بازالت‌های سلطان میدان در تمامی رخنمون‌ها از نظر جایگاه چینه‌شناسی به‌صورت همشیب روی سازند قلی (به سن اردوویسین فوقانی) قرار گرفته و با ناپیوستگی همشیبِ فرسایشی به وسیله‌ی سازند پادها (به سن دونین زیرین-میانی) پوشیده می‌شود. همچنین در دنباله‌های سنگی اردوویسین تا دونین در منطقه‌ی مورد بررسی، مرز بین تمامی واحدهای سنگی به صورت همشیب بوده و هیچگونه دگرشیبی دیده نمی‌شود. ماگماتیسم بازی در منطقه‌ی مورد بررسی صرفاً به بازالت‌های سلطان میدان محدود نبوده است و می‌توان گدازه-های با ترکیب بازالتی را در سازند قلی [۸] و سازندهای پادها و خوش‌ییلاق [۹] نیز مشاهده کرد.

بازالت‌های سلطان میدان در تمامی رخنمون‌های خود دارای ظاهری تقریباً یکنواخت بوده و غالباً ناپیدا بلور هستند. با این وجود، در برخی موارد می‌توان درشت بلورهای پلاژیوکلاز و پیروکسن و گاهی الیوین را در آنها دید. با وجود ظاهر یکنواخت در این بازالت‌ها، شدت و ضعف درجه‌ی دگرسانی و حضور مقادیر مختلف کانی‌های ثانویه‌ی حاصل از دگرسانی در آن‌ها باعث می‌شود که در صحرا به رنگ تیره تا سبز دیده شوند. کلریتی شدن و به مقدار کمتر اپیدوتی شدن، شایع‌ترین دگرسانی‌های رخ داده در این مجموعه، و مهمترین عامل در بروز رنگ سبز در برخی از روانه‌های گدازه هستند.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی (الف) و نقشه‌ی ساده شده‌ی زمین‌شناسی از واحدهای سنگی اردوویسین تا دونین در سه رخنمون اصلی مورد بررسی در گستره‌ی شمال روستای نکارمن (ب) شمال‌غرب روستای قلعه‌نو خرقان (پ) و روستای خوش‌ییلاق (ت).

روش بررسی

به منظور بررسی‌های سنگ نگاری، تعداد ۲۷۰ عدد مقطع نازک از نمونه‌های منطقه تهیه و به وسیله‌ی میکروسکوپ قطبشی مورد بررسی قرار گرفتند. پس از سنگ‌نگاری دقیق روی بازالت‌های منطقه و به منظور بررسی‌های مایکروپروب الکترونی، تعداد ۱۰ نمونه‌ی مناسب انتخاب و از هر نمونه ۲ مقطع نازک-صیقلی تهیه شدند. سپس از میان ۲۰ مقطع نازک-صیقلیِ تهیه شده، ۱۰ نمونه در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران و ۱۰ نمونه‌ی دیگر در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فنی خاورمیانه (Middle East Technical University) در ترکیه مورد بررسی میکرو آنالیز الکترونی (EPMA) قرار گرفتند. داده‌های حاصل از این دو مرکز تحقیقاتی شامل تعداد ۶۳۹ تجزیه‌ی شیمیایی نقطه‌ای (۳۰۶ آنالیز بازالت‌های دره‌ی کلودر، ۳۰۲ نقطه از بازالت‌های دره‌ی چشمه‌سید و ۳۱ آنالیز از بازالت‌های منطقه‌ی خوش‌ییلاق) به همراه تصاویر میکروسکوپ الکترونی (BSE) و آنالیز کیفی به روش EDS بوده‌اند.

تجزیه‌ی ریز پردازش الکترونی در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران با یک ابر پردازنده‌ی نوع SX100 که دارای ۵ بیناب با طول موج انتشاری (WDS) و یک سیستم انرژی انتشاری (EDS) بود، به وسیله‌ی شتاب‌دهنده‌ی با ولتاژ ۱۵ کیلو ولت و جریان ۱۵ نانو آمپر شتاب داده شد. تجزیه‌ی ریز پردازش الکترونی در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه‌ی فنی خاورمیانه نیز با دستگاه ابر پردازنده‌ی نوع JEOL JXA-8230 که دارای ۵ طیف سنج با طول موج انتشاری می‌باشد، با شتاب دهنده‌ی با ولتاژ ۱۵ کیلو ولت و جریان پرتوی ۲۰ نانو آمپر و باریکه‌ای از جریان به قطر ۵ میکرومتر انجام گرفت.

بحث و بررسی

سنگ نگاری

بازالت‌های سلطان میدان در زیر میکروسکوپ دارای ترکیب تقریباً یکنواختی بودند. کانی‌های اصلیِ تشکیل دهنده‌ی این بازالت‌ها شامل پلاژیوکلاز وکلینوپیروکسن بوده و اکسیدهای آهن-تیتان مهم‌ترین کانی فرعی آن را تشکیل می‌دادند. در برخی از روانه‌ها الیوین نیز به صورت کانی فرعی حضور داشت. به‌طور کلی سنگ‌های آذرین منطقه از نظر سنگ‌نگاری دارای ترکیب بازالت تا آندزیت‌بازالتی بودند.

بررسی‌های ریز پردازشی بیانگر درجات متوسط تا شدید دگرسانی در پلاژیوکلازهای منطقه بوده و عموماً سریسیتی و سوسوریتی شده بودند. به طوری که در نتیجه‌ی عملکردِ دگرسانی می‌توان کانی‌های ثانویه‌ای نظیر کلریت، اپیدوت و کلسیت را به فراوانی روی آن‌ها مشاهده کرد. پیروکسن‌ها که دستخوش کمترین دگرسانی بین کانی‌های اصلیِ سنگ‌های منطقه بودند، عموماً از نوع اوژیت و گاهی تیتان‌اوژیت بوده و ارتوپیروکسن در آن‌ها حضور نداشت. در نتیجه میان کانی‌های تشکیل دهنده‌ی بازالت‌های منطقه، الیوین‌ها شدیدترین درجه-ی دگرسانی را نشان می‌دهند و تماماً به وسیله‌ی کانی‌های ثانویه جانشین شده‌اند. کانی‌های کلریت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز، اسفن، کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن مهمترین کانی‌های ثانویه‌ی مجموعه بودند. همچنین تقریباً تمامی شیشه‌های بازالتی اولیه در نتیجه‌ی شیشه‌زدایی به طور کامل به کلریت تبدیل شده‌اند. مهمترین بافت‌های موجود در بازالت-های منطقه نیز شامل پورفیری با خمیره‌ی میکرولیتی، پورفیری با خمیره‌ی میکرولیتی-شیشه‌ای (هیالوپیلیتیک)، میکرولیتی، سریه‌ایتی، جریانی، پوئی‌کیلیتیک، افیتیک، ساب-افیتیک، اینترسرتال، حفره‌ای، بادامکی و گلومروپورفیری بودند. ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی سنگ‌های منطقه بیانگر توقف ماگما در آشیانه‌های ماگمایی و تبلور و جدایش ماگمایی در آن‌ها پیش از صعود نهایی بوده است [۱،۲].

شیمیِ کانی‌های تشکیل دهنده‌ی بازالت‌های منطقه

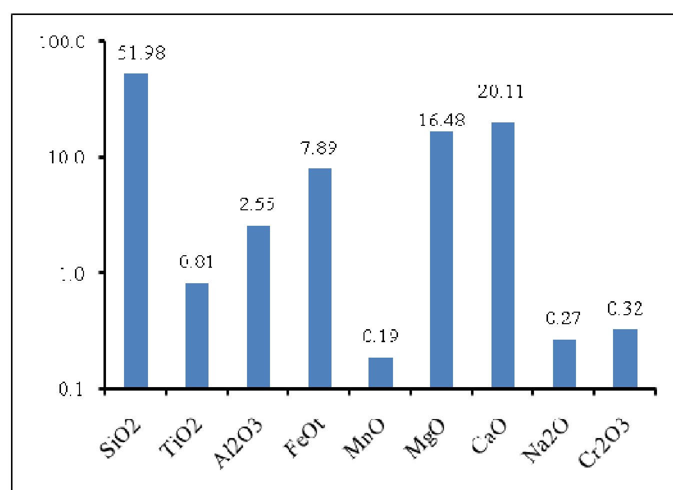
شیمیِ پیروکسن

به منظور بررسی ترکیب دقیق پیروکسن‌های موجود در بازالت-های سلطان میدان، ۳۵۲ آنالیز نقطه‌ای روی آن‌ها صورت گرفت. میانگینِ ترکیب کل پیروکسن‌های منطقه در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه شده است.

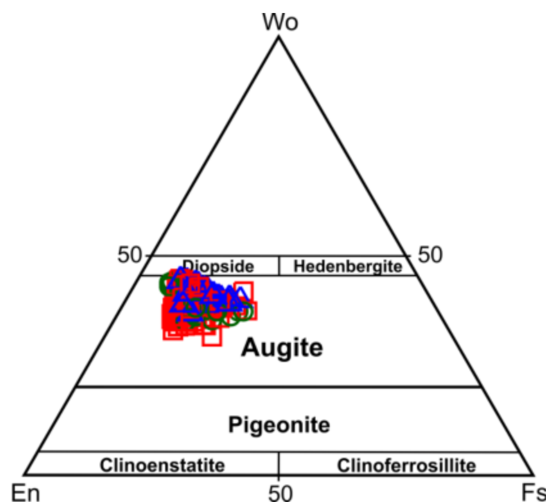
ترکیب‌های مختلف پیروکسن‌ها به صورت محلول جامد با اعضای انتهایی $Ca_2Si_2O_6$، $Mg_2Si_2O_6$ و $Fe_2{+}_2Si_2O_6$ و همراه با تغییرات مقادیر Ca-Mg-Fe بودند. برای تعیین نوع دقیق پیروکسن‌های منطقه از نمودار رده‌بندی [۱۰] استفاده شد (شکل ۳). بر این اساس، تقریباً تمامی پیروکسن‌های منطقه دارای ترکیب اوژیتی بودند. همچنین تصاویر آنالیز کیفی به روش EDS نیز تأییدی بر اوژیتی بودن ترکیب آن‌ها بود (شکل ۴).

جدول ۱ میانگین کلی ترکیب کانی‌هایی که در بازالت‌های منطقه‌ی مورد تجزیه‌ی ریز پردازش الکترونی قرار گرفته‌اند.

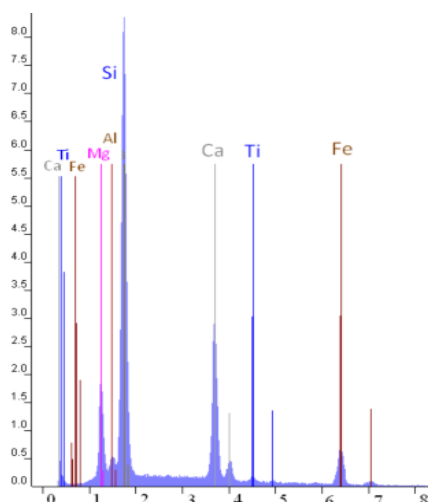
کانی	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	Total
کلینوپیروکسن	۵۱٫۹۸	۰٫۸۱	۲٫۵۵	۷٫۸۹	۰٫۱۹	۱۶٫۴۸	۲۰٫۱۱	۰٫۲۷	۰٫۰۱	۰٫۳۲	۱۰۰٫۵
پلاژیوکلاز (آلبیتی)	۶۶٫۹۷	۰٫۰۳	۲۰٫۷۹	۰٫۱۲	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۶۹	۱۱٫۱۱	۰٫۰۹	۰	۹۹٫۸۵
پلاژیوکلاز (سالم)	۵۲٫۶۴	۰٫۱۲	۲۹٫۱۸	۰٫۹۷	۰٫۰۱	۰٫۱۴	۱۲٫۷۱	۴٫۵۵	۰٫۳۸	۰	۱۰۰٫۷
کلریت	۲۹٫۸۳	۰٫۰۴	۱۶٫۵۵	۲۵٫۶۷	۰٫۴۸	۱۵٫۰۶	۰٫۴۸	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۸۸٫۱۸
اسفن	۳۱٫۷۹	۳۱٫۳۸	۲٫۸۴	۳٫۴۱	۰٫۰۲	۰٫۱۱	۲۸٫۵۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۹۸٫۱۱
اپیدوت	۳۹	۰٫۰۹	۱۹٫۷۹	۱۱٫۴۱	۰٫۱۸	۴٫۵۲	۱۸٫۳۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۹۳٫۳۴
ایلمنیت	۰٫۲	۴۵٫۱۵	۰٫۰۳۴	۴۳٫۳۹	۵٫۸۴	۰٫۰۱	۰٫۳۱	۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۹۴٫۹۶
مگنتیت	۲٫۱۹	۴٫۱۹	۰٫۴۳	۸۲٫۵۳	۰٫۰۹	۰٫۱۲	۰٫۸۵	۰٫۱۵	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۹۰٫۶۰
تیتانومگنتیت	۰٫۴۱	۲۱٫۵۸	۱٫۱۸	۶۹٫۴۵	۰٫۱۴	۰٫۰۹	۰٫۲۲	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۹۳٫۱۴
لوکوکسن	۱۲٫۸۵	۶۸٫۵۶	۰٫۳۶	۲٫۲۶	۰٫۱۲	۰٫۰۸	۱۱٫۴۴	۰٫۰۴	۰	۰	۹۵٫۷۱



شکل ۲ میانگین ترکیب پیروکسن‌های موجود در بازالت‌های منطقه. داده‌ها روی محور عمودی به صورت لگاریتمی است.

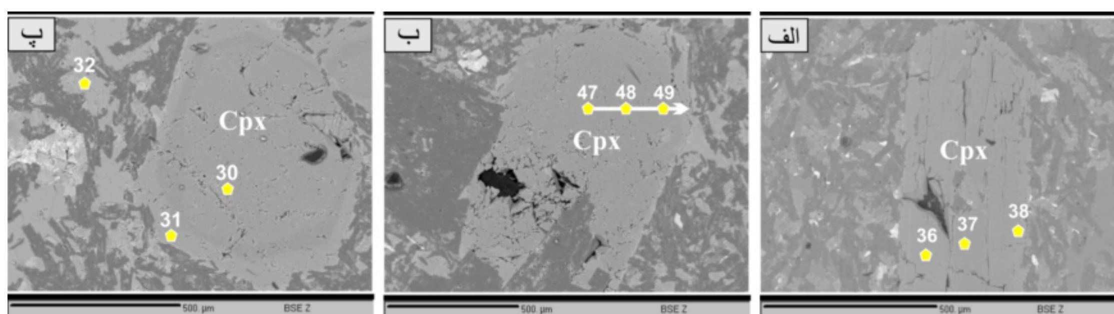


شکل ۳ رده‌بندی پیروکسن‌های منطقه روی نمودار [۱۰]. در این نمودار نمونه‌های دره‌ی کلودر با نشانه‌ی (△)، نمونه‌های دره‌ی چشمه‌سید با نشانه‌ی (□) و نمونه‌های منطقه‌ی خوش-ییلاق با نشانه‌ی (○) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۴ تصویر آنالیز کیفی به روش EDS روی یک نمونه از کلینوپیروکسن‌های موجود در بازالت‌های منطقه.

به منظور بررسی تغییرات ترکیبی در هر کدام از بلورهای اوژیت موجود در بازالت‌های منطقه، از برخی کلینوپیروکسن‌ها آنالیز نقطه‌ای در مقطع عرضی و از مرکز به حاشیه انجام شد. در شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از برخی اوژیت‌های منطقه به همراه محلی که روی آن‌ها آنالیز نقطه‌ای انجام شد، نمایش داده شده و در جدول ۲ نیز نتایج این آنالیزهای نقطه‌ای آمده اند. در شکل ۵ الف و ب دو بلور اوژیت نشان داده شده که در آن از مرکز به حاشیه (جدول ۲، نقاط ۳۶- ۳۸ و ۴۷-۴۹) به تدریج از مقادیر MgO، CaO، Cr_2O_3 و Al_2O_3 کاسته شد و مقادیر FeO، MnO و TiO_2 افزایش یافت. روند تغییرات ترکیبی در تمامی اوژیت‌های موجود در بازالت‌های منطقه غالباً از یک چنین نظمی برخوردار بودند و معمولاً اکسیدهای SiO_2 و Na_2O تغییرات منظمی نشان نمی‌دادند. در واقع روند تغییرات عناصر (به خصوص MgO، CaO، Cr_2O_3، FeO و MnO) در اوژیت‌های منطقه بیانگر تغییرات ترکیبی عادی در آن‌ها و تبلور تدریجی آن‌ها حین سرد شدن در شرایط عادی از مذاب بازالتی بوده است. همچنین شکل ۵ پ، تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک بلور اوژیت را نشان می‌دهد که در حاشیه‌ی آن منطقه‌بندی ترکیبی روشنی دیده می‌شود. آنالیز نقطه‌ای در این بلور (جدول ۲، نقاط ۳۰ و ۳۱) نشان می‌دهد که مشابه با کلینوپیروکسن‌های فاقد منطقه‌بندی، از مرکز به حاشیه از مقادیر MgO، CaO، Cr_2O_3، Na_2O و Al_2O_3 کاسته شده و بر مقادیر FeO و MnO و TiO_2 افزوده شد. همچنین در شکل ۵ پ یک بلور کوچک اوژیت که در زمینه‌ی سنگ قرار دارد نیز مورد تجزیه‌ی نقطه‌ای قرار گرفت (جدول ۲، نقطه‌ی ۳۲). این نقطه نیز نسبت به نقاط ۳۰ و ۳۱ همان روندهای قبلیِ تغییرات عناصر (از مرکز به حاشیه) را نسبت به درشت بلور مجاورش نشان داده و یک روند تبلور عادی طی شکل گیری ماگما را آشکار می‌سازد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که منطقه‌بندی عادی در اوژیت‌ها به دلیل ایجاد وقفه در رشد بلورها در مخزن ماگمایی و یا حین صعود ماگما رخ داده و نقش و عملکرد عواملی نظیر آلایش یا اختلاط ماگمایی منتفی است.



شکل ۵ تصاویر BSE از بلورهای اوژیت فاقد منطقه‌بندی (الف و ب) و دارای منطقه‌بندیِ (پ) ترکیبی در بازالت‌های منطقه. نتایج تجزیه‌ی شیمیایی نقاط آنالیز شده در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

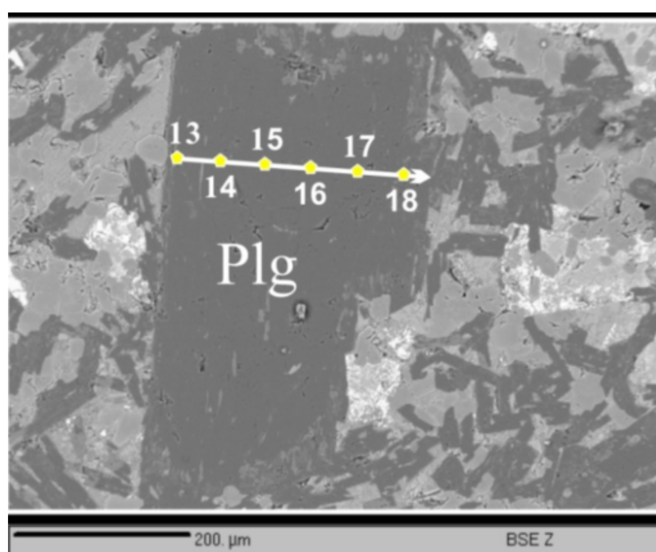
جدول ۲ نتایج تجزیه‌ی نقطه‌ای بر روی سه بلور اوژیت در بازالت‌های منطقه. تصاویر BSE در شکل ۵ نمایش داده شده است.

Point N.	Position	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na_2O	Cr_2O_3	Total
۳۶	حاشیه	۵۲٫۴۷	۰٫۸۳	۲٫۷۳	۷٫۲۶	۰٫۱۴	۱۶٫۶۹	۲۰٫۹۲	۰٫۳	۰٫۲۲	۱۰۱٫۶
۳۷	مرکز	۵۲٫۳۲	۰٫۷	۳٫۲۱	۵٫۸۶	۰٫۱۳	۱۶٫۸	۲۱٫۵۵	۰٫۲۳	۰٫۷۱	۱۰۱٫۵
۳۸	حاشیه	۵۱٫۶۲	۰٫۸۶	۱٫۷۱	۷٫۳۷	۰٫۱۸	۱۶٫۳۲	۲۰٫۹۳	۰٫۳	۰٫۴۷	۹۹٫۸
۴۷	مرکز	۵۱٫۷۷	۰٫۵۹	۲٫۹	۶٫۵۷	۰٫۱۳	۱۷٫۲۹	۲۰٫۷۷	۰٫۲۹	۰٫۵۳	۱۰۰٫۸
۴۸		۵۱٫۵۶	۰٫۶۲	۲٫۸۴	۶٫۶۲	۰٫۱۶	۱۷٫۲۹	۲۰٫۶۶	۰٫۹۲	۰٫۴۹	۱۰۱٫۱
۴۹	حاشیه	۵۱٫۲۴	۰٫۷	۳٫۲۹	۷٫۵۸	۰٫۱۸	۱۶٫۹۷	۲۰٫۰۹	۰٫۲۲	۰٫۳۸	۱۰۰٫۶
۳۰	مرکز	۵۱٫۶۲	۰٫۶۵	۲٫۸۲	۷٫۱۲	۰٫۱۵	۱۷٫۱۲	۲۰٫۴۲	۰٫۲۲	۰٫۵۸	۱۰۰٫۷
۳۱	حاشیه	۵۱٫۰۸	۰٫۶۸	۱٫۷۷	۱۱٫۳۴	۰٫۲۵	۱۵٫۴۸	۱۸٫۴۴	۰٫۱۸	۰٫۰۹	۹۹٫۳
۳۲	ریز بلور	۵۰٫۱۹	۱٫۰۷	۱٫۵۹	۱۵٫۴	۰٫۳۹	۱۲٫۹۴	۱۷٫۹۷	۰٫۲۴	۰	۹۹٫۸

شیمیِ پلاژیوکلاز

پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی در بازالت‌های منطقه است که به دو صورت درشت بلور و میکرولیت حضور دارند. به طور کلی نتایج تجزیه‌ی ریزپردازش الکترونی روی پلاژیوکلازهای منطقه تأیید کننده‌ی شواهد سنگ‌نگاری مبنی بر عملکرد دگرسانی روی آن‌هاست. این نتایج نشان می‌دهند که عملکرد فرآیند دگرسانی روی بازالت‌های منطقه به حدی بود که عموماً منجر به خروج کلسیم و ورود سدیم به ترکیب پلاژیوکلازها و سدی شدن ترکیب آن‌ها شده است (اسپیلیتی شدن). به‌طوری که ترکیب اکثر پلاژیوکلازهای منطقه از نوع آلبیتی است (شکل ۶ و جدول‌های ۱ و ۳). در شکل ۷ ترکیبِ ۳ نمونه از پلاژیوکلازهای منطقه که دستخوش عملکرد فرآیند آلبیتی شدن قرار گرفته‌اند (An_{1-2})، ارائه شده است. با وجود تأثیر شدید دگرسانی روی اغلب پلاژیوکلازهای منطقه و سدی شدن آن‌ها، تعداد معدودی از آن‌ها که دستخوش دگرسانی کمتری شده‌اند نیز مورد تجزیه‌ی ریز پردازشی الکترونی قرار گرفته‌اند (جدول ۱). این پلاژیوکلازهای سالم‌تر با مقادیر An_{56} تا An_{64}، ترکیب لابرادوریتی را برای پلاژیوکلازهای منطقه نشان می‌دهند که با بررسی‌های ریز پردازشی (بر اساس زاویه‌ی خاموشی) کاملاً همخوانی دارد (شکل ۷).

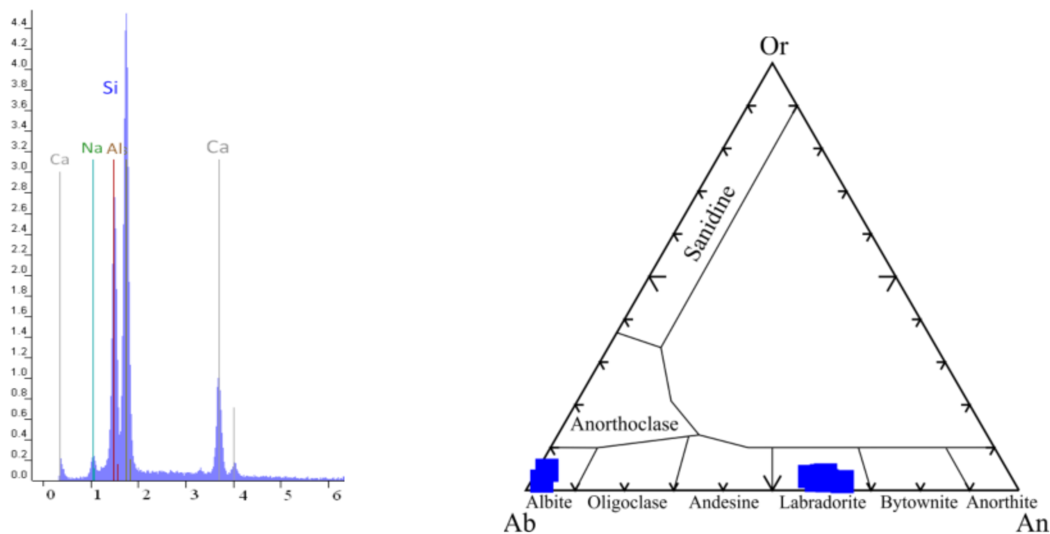
از آنجا که تأثیر دگرسانی روی پلاژیوکلازهای منطقه نسبتاً شدید بوده است، نتایج تجزیه‌ی شیمیایی در مقطع عرضیِ این بلورها، به دلیل پراکندگی، دارای اعتبار نبوده و قابلیتِ تفسیرِ مناسب را ندارند. در شکل ۸ تصویر آنالیز کیفی به روش EDS روی یکی از پلاژیوکلازهای سالم منطقه نمایش داده شد.



شکل ۶ تصویر BSE از یک پلاژیوکلاز در بازالت‌های منطقه. نتایج تجزیه‌ی شیمیایی نقاط آنالیز شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳ نتایج آنالیز نقطه‌ای بر روی یکی از پلاژیوکلازهای منطقه. تصویر BSE و محل آنالیز مربوط به این نقاط در شکل۶ نمایش داده شدند.

Point N.	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	Total
۱۳	۶۷٫۷۸	۰	۲۰٫۳۳	۰٫۱۲	۰	۰٫۰۲	۰٫۵۷	۱۱٫۱	۰٫۱۶	۰	۱۰۰٫۱
۱۴	۶۷٫۱	۰	۲۰٫۲۲	۰٫۰۵	۰	۰	۰٫۵	۱۱٫۶۲	۰٫۰۸	۰٫۰۱	۹۹٫۶
۱۵	۶۷٫۱۴	۰٫۰۱	۲۱٫۲۹	۰٫۰۶	۰٫۰۱	۰	۰٫۷۸	۱۱٫۵۱	۰٫۱	۰	۱۰۰٫۹
۱۶	۶۷٫۵۸	۰	۲۱٫۳۱	۰٫۰۱	۰	۰	۰٫۵	۱۰٫۶۲	۰٫۱۲	۰٫۰۱	۱۰۰٫۲
۱۷	۶۶٫۳۷	۰	۲۱٫۲۱	۰٫۸۲	۰٫۰۱	۰٫۲	۰٫۷۳	۱۱٫۱۳	۰٫۱	۰	۱۰۰٫۶
۱۸	۶۶٫۶۲	۰	۲۰٫۸۶	۰٫۰۵	۰	۰٫۰۱	۰٫۶۵	۱۱٫۶۱	۰٫۰۸	۰٫۰۱	۹۹٫۹



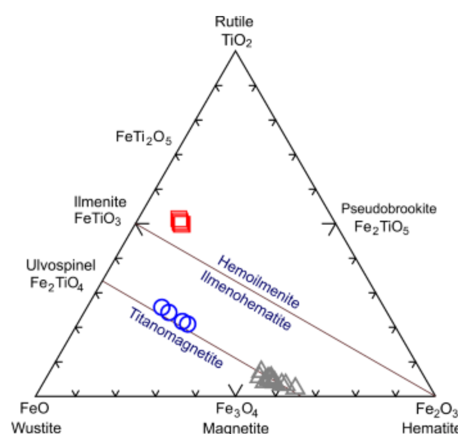
شکل ۷ رده‌بندیِ برخی از پلاژیوکلازهای منطقه روی نمودار مثلثی آلبیت-آنورتیت- اورتوز از [۱۱].

شکل ۸ تصویر آنالیز کیفی به روش EDS از یکی از پلاژیوکلازهای نسبتاً سالم موجود در بازالت‌های منطقه.

شیمیِ کانی‌های کدر

کانی‌های کدر، گروه مهمی از کانی‌های فرعی موجود در بازالت-های منطقه را تشکیل می‌دهند. این کانی‌ها که در آنالیز کیفی به روش EDS و تجزیه‌ی ریز پردازشی الکترونی مشاهده شدند، شامل اسفالریت و اکسیدهای مختلفِ آهن-تیتان می شوند. اسفالریت در نمونه‌های منطقه از فراوانی برخوردار نبوده است و صرفاً در برخی از روانه‌های گدازه در مقادیر محدودی دیده می‌شوند. ولی برخلافِ اسفالریت، اکسیدهای مختلفِ آهن-تیتان را می‌توان به فراوانی در بازالت‌های منطقه مشاهده کرد. ترکیبات اکسیدهای مختلفِ آهن-تیتان (جدول ۱) در نمونه‌های منطقه روی نمودار طبقه‌بندی سه‌تایی $FeO-Fe_2O_3-TiO_2$ در سه گروه مختلف قرار گرفته و از نوع ایلمنیت، مگنتیت و تیتانومگنتیت هستند (شکل ۹). با توجه به اینکه ایلمنیت و تیتانومگنتیت تقریباً در تمامی نمونه‌های منطقه به‌صورت کانی فرعی حضور دارند، تمرکزِ بخش بزرگ عنصر تیتانیوم در بازالت‌های منطقه را باید در این کانی‌ها دانست.

در بازالت‌های منطقه ایلمنیت غالباً به صورت بلورهای سوزنی و کشیده در درون شیشه‌های تبدیل شده به کلریت و یا در لابلای درشت بلورها دیده می‌شود که این نشان دهنده‌ی تبلور تأخیری این فاز نسبت به کانی‌های اصلی سنگ (پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن) است. همچنین یکی از پدیده‌های متداول در برخی از نمونه‌های منطقه حضور هاله‌هایی از لوکوکسن در اطراف برخی از بلورهای ایلمنیت و تیتانومگنتیت است.



شکل ۹ نمودار رده‌بندی $FeO-Fe_2O_3-TiO_2$ از [۱۲] برای نمایش اکسیدهای مختلفِ آهن-تیتان در نمونه‌های منطقه.

دما-فشارسنجی (Thermobarometry)

بیشترِ دما-فشارسنج‌های پیروکسنی که تاکنون معرفی شده‌اند بر مبنای تعادل بین دو پیروکسن (ارتو و کلینوپیروکسن) هستند. این امر سبب ایجاد محدودیت‌هایی در بکارگیری آن‌ها در سیستم‌های آذرینی نظیر بازالت‌های سلطان میدان می‌شود که در آن‌ها تنها یک نوع پیروکسن حضور دارد. همچنین پلاژیوکلازهای منطقه نیز به دلیل شدت عملکرد دگرسانی قابلیت استفاده در دما- فشارسنجی را ندارند. به همین دلیل در این پژوهش به منظور بررسی‌های دما- فشارسنجی روی نمونه-های منطقه، از روش‌های ارائه شده توسط [۱۳-۱۵] که بر مبنای تعادل بین کلینوپیروکسن-مذاب و یا ترکیبِ تک بلور کلینوپیروکسن استوارند، استفاده شد.

در این روش‌ها، ترکیبات مذاب بر مبنای کسر کاتیونیِ ترکیبات بدون آب بوده و کاتیون‌های تشکیل دهنده‌ی کلینوپیروکسن نیز بر مبنای ۶ اتم اکسیژن محاسبه می‌شود. همچنین در روش‌های [۱۳-۱۵] ترکیبات مختلف پیروکسن نظیر ژادئیت (Jd)، دیوپسید+هدنبرژیت (DiHd) و انستاتیت + فروسیلیت (EnFs) به وسیله‌ی یک الگوی انگاری مورد محاسبه قرار می‌گیرند.

دما- فشارسنجیِ تشکیل کلینوپیروکسن‌ها به روش [۱۳]

در این روش براورد دما و فشار بر اساس کلینوپیروکسنِ همیافت با ترکیب گدازه‌ی مافیک استوار بوده و به منظور محاسبه‌ی دما و فشارِ تبلور کلینوپیروکسن به ترتیب از معادلات ۱ و ۲ استفاده می‌شود:

$$10^4/T = 6.59 - 0.16*\ln[Jd^{px}*Ca^{liq}*Fm^{liq}/DiHd^{px}*Na^{liq}*Al^{liq}] - 0.65*\ln[Mg^{liq}/Mg^{liq} + Fe^{liq}] + 0.23*\ln[ca^{liq}] - 0.02p$$ (معادله ۱)

$$P = -54.3 + 299*T/10^4 + 36.4*T/10^4\ln[Jd^{px}/[Si^{liq}]^2*Na^{liq}*Al^{liq}] + 367*[Na^{liq}*Al^{liq}]$$ (معادله ۲)

Fm= FeO + MgO, DiHd = diopside + hedenbergite, *liq* = liquid, *px* = pyroxene

براوردهای دما و فشارِ تبلور اوژیت‌های منطقه بر اساس معادلات ۱ و ۲ بیانگر دمای تشکیل بین ۱۱۰۵٫۵ تا ۱۱۸۶٫۵ درجه‌ی سانتیگراد و فشار بین ۰ تا ۶٫۱ کیلوبار است (شکل ۱۰ الف).

دما- فشارسنجیِ تشکیل کلینوپیروکسن‌ها به روش [۱۴]

اساسِ کار این دما- فشارسنج بر تبلور ژادئیت و تبادل تعادلی بین ژادئیت- دیوپسید+هدنبرژیت (نورماتیو نگاری) استوار بوده و برای محاسبه‌ی دما و فشارِ تبلور کلینوپیروکسن به ترتیب از معادلات ۳ و ۴ استفاده می‌شود:

$$10^4/T(k) = 4.60 - 4.37*10^{-1}\ln[[Jd^{cpx}Ca^{liq}Fm^{liq}]/DiHd^{cpx}Na^{liq}Al^{liq}]] - 6.54*10^{-1}\ln[Mg'^{liq}] - 3.26*10^{-1}\ln[Na^{liq}] - 6.32*10^{-3}[P(kbar)] - 0.92\ln[Si^{liq}] + 2.74*10^{-1}\ln[Jd^{cpx}]$$ (معادله‌ی ۳)

$$P(kbar) = -88.3 + 2.82*10^{-3}T(K)\ln[[Jd^{cpx}]/[Na^{liq}Al^{liq}(Si^{liq})^2]] + 2.19*10^{-2}T(K) - 25.1\ln[Ca^{liq}Si^{liq}] + 7.03[Mg'^{liq}] + 12.4\ln[Ca^{liq}]$$ (معادله‌ی۴)

$$Fm^{liq} = FeO^{liq} + MgO^{liq}$$
$$Mg'^{liq} = MgO^{liq}/(MgO^{liq} + FeO^{liq})$$

بر اساس معادلات ۳ و ۴ دمای تبلور پیروکسن‌ها بین ۱۰۹۲٫۸ تا ۱۱۹۴٫۴ درجه‌ی سانتیگراد و فشار بین ۰ تا ۶٫۹ کیلوبار متغیر است (شکل ۱۰ ب).

دما- فشارسنجیِ تشکیل کلینوپیروکسن‌ها به روش [۱۵]

در این روش بر اساس محاسبه‌ی میزان فعالیت انستاتیت در کلینوپیروکسن (ارائه شده توسط [۱۶])، و نیز توزیع Al بین کلینوپیروکسن-مذاب می‌توان دما (معادله‌ی ۵) و فشارِ (معادلات ۶ و ۷) تبلور کلینوپیروکسن را تعیین کرد. برتری معادله‌ی ۵، تعیین دمای تشکیل تک بلورِ کلینوپیروکسن بدون دخالت ترکیب مذاب است.

$$T(K) = 93100 + 544P(kbar)/61.1 + 36.6(X_{Ti}^{cpx}) + 10.9(X_{Fe}^{cpx}) - 0.95(X_{Al}^{cpx} + X_{Cr}^{cpx} - X_{Na}^{cpx} - X_K^{cpx}) + 0.395[\ln(a_{En}^{cpx})]^2$$ (معادله‌ی ۵)

در این معادله:

$$X_{Al}^{cpx} = X_{Al(IV)}^{cpx} + X_{Al(VI)}^{cpx}$$
$$a_{En}^{cpx} = (1-X_{Ca}^{cpx} - X_{Na}^{cpx} - X_K^{cpx}) . (1- 0.5(X_{Al}^{cpx} + X_{Cr}^{cpx} + X_{Na}^{cpx} + X_k^{cpx}))$$

$$P(kbar) = -40.73 + 358T(K)/10^4 + 21.69T(K)/10^4\ln[X_{NaAlSi2O6}^{cpx}/X_{NaO0.5}^{liq}X_{AlO1.5}^{liq}(X_{SiO2}^{liq})^2] - 105.7(X_{Cao}^{liq}) - 165.5(X_{NaO0.5}^{liq} + X_{KO0.5}^{liq})^2 - 50.15(X_{SiO2}^{liq})(X_{FeO}^{liq} + X_{MgO}^{liq}) - 3.178\ln(X_{DiHd}^{cpx}) - 2.205\ln(X_{EnFs}^{cpx} + 0.864\ln(X_{Al}^{cpx}) + 0.3962(H2O^{liq})$$ (معادله ۶)

در ایـــن معادلـــه $X_{Al}^{cpx} = X_{Al(IV)}^{cpx} + X_{Al(VI)}^{cpx}$ و $NaAlSi_2O_6^{cpx} = NaO_{0.5}^{liq} + AlO_{1.5}^{liq} + 2SiO_2^{liq}$ است.

$$P(kbar) = -57.9 + 0.0475T(K) - 40.6(X_{FeO}^{liq}) - 47.7(X_{CaTs}^{cpx}) + 0.676(H2O^{liq}) - 153(X_{CaO0.5}^{liq}X_{SiO2}^{liq}) + 6.89[X_{Al}^{cpx}/X_{AlO1.5}^{liq}]$$ (معادله‌ی ۷)

در این معادله $X_{Al}^{cpx} = X_{Al(IV)}^{cpx} + X_{Al(VI)}^{xpx}$است.

دمای تبلور اوژیت‌های منطقه بنابر معادله‌ی ۵، برابر با ۱۱۰۵٫۵ تا ۱۲۲۶٫۵ درجه‌ی سانتیگراد بوده و فشار نیز بر اساس معادلات ۶ و ۷ به ترتیب ۰٫۷ تا ۷٫۹ و ۰٫۷ تا ۹ کیلوبار است. در شکل ۱۰ پ میانگین فشار به دست آمده از معادلات ۶ و ۷ (با میانگینِ ۱٫۳ تا ۸ کیلوبار) نسبت به دما (معادله‌ی ۵) به تفکیک هر منطقه روی نمودارهای دو متغیره نمایش داده شده‌اند.

به منظور نمایشی کلی براوردهای تخمین‌های به دست آمده برای دما و فشار به روش‌های مختلفِ [۱۳-۱۵]، میانگینی از این تغییرات دما (میانگینِ معادلات ۱، ۳ و ۵) و فشار (میانگینِ روابط ۴، ۶ و ۷) در شکل ۱۰ ت ارائه شده‌اند. بر این اساس، بازه‌ی دمایی ۱۱۰۵٫۲ تا ۱۱۹۶٫۳ درجه‌ی سانتیگراد، و فشار بین ۱ تا ۷٫۷ کیلوبار برای تبلور اوژیت‌های منطقه‌ی مورد بررسی پیشنهاد می‌شود.

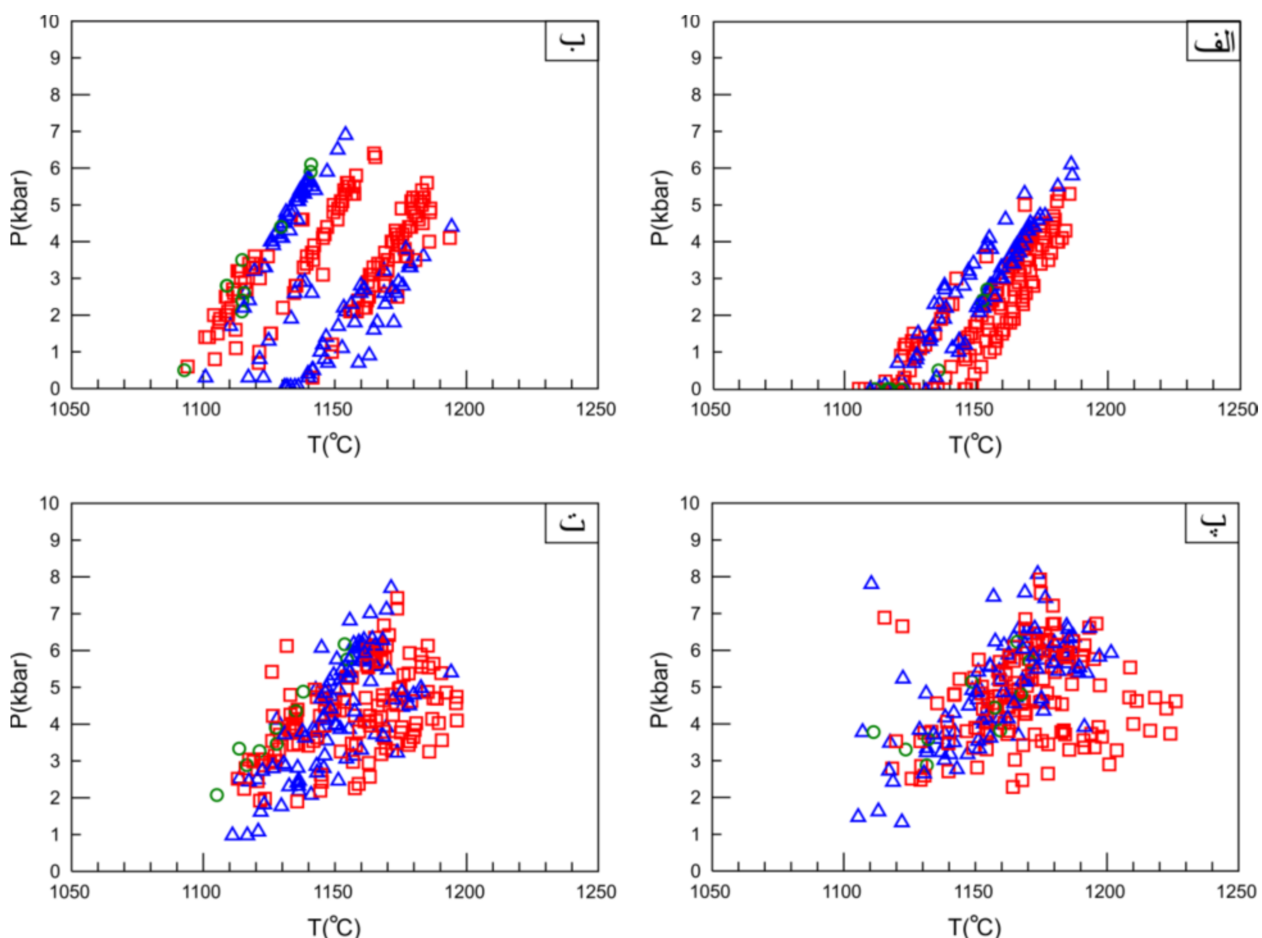
دما-فشارسنجیِ تشکیل کلینوپیروکسن‌ها به روش [۱۷]

روش [۱۷] نیز به عنوان یکی از روش‌های براورد دما و فشار بر اساس پیروکسن‌های موجود در گدازه‌های بازالتی پیشنهاد شده است. در این روش که دما و فشار به صورت ترسیمی نمایش داده می‌شوند، محور X و Y بر اساس دو شاخص XPT و YPT تعریف شده است. محاسبه‌ی شاخص‌های XPT و YPT به منظور تعیین موقعیت نقاطِ تجزیه روی نمودار، به ترتیب با معادلات ۸ و ۹ امکان پذیر است:

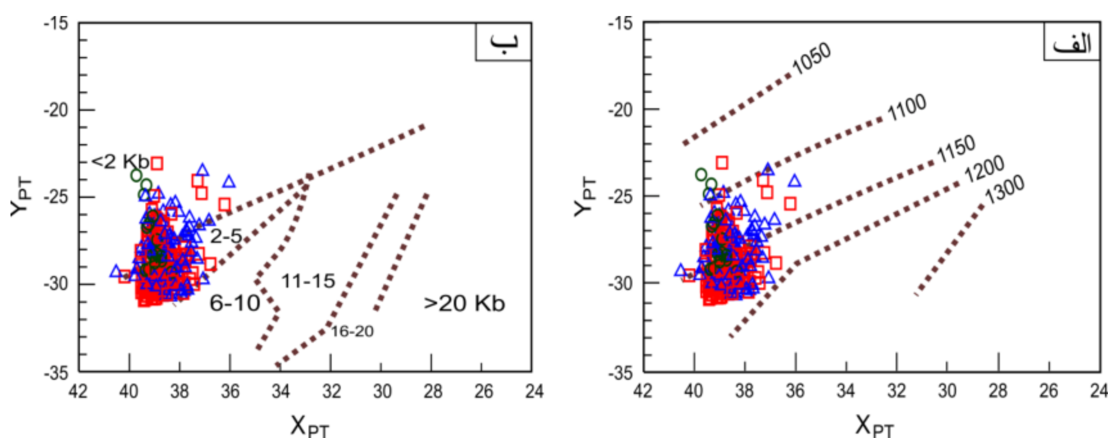
$$XPT = 0.446SiO_2 + 0.187TiO_2 - 0.404Al_2O_3 + 0.346FeO(tot) - 0.052MnO + 0.309MgO + 0.431CaO - 0.446Na_2O \quad \text{(معادله ۸)}$$

$$YPT = -0.369SiO_2 + 0.535TiO_2 - 0.317Al_2O_3 + 0.323FeO(tot) + 0.235MnO - 0.516MgO - 0.167CaO - 0.153Na_2O \quad \text{(معادله ۹)}$$

بنابر این معادلات، اوژیت‌های منطقه در بازه‌ی دمایی حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و فشار کمتر از ۶ کیلوبار متبلور شده‌اند (شکل ۱۱).



شکل ۱۰ نمایش گستره‌ی تغییرات دما و فشار تبلور اوژیت‌های منطقه به الف) روش [۱۳] ب) روش [۱۴] پ) روش [۱۵]. ت) نمایش میانگین تغییرات دما و فشار تبلور اوژیت‌های منطقه بر اساس [۱۳-۱۵]. نشانه‌های مورد استفاده مشابه شکل ۳ هستند.



شکل ۱۱ براورد دما (الف) و فشارِ (ب) تبلور اوژیت‌های منطقه به روش [۱۷]. نشانه‌های مورد استفاده مشابه شکل ۳ انتخاب شده اند.

به‌طور کلی نتایج حاصل از دما- فشارسنجی روی کلینوپیروکسن‌های موجود در بازالت‌های سلطان میدان به روش‌های [۱۳-۱۵، ۱۷]، دربردارنده‌ی نتایج بسیار قابل قبول و هماهنگ با یکدیگر و نیز سازگار با شواهد سنگ نگاری هستند، به طوری که دماهای به دست آمده بر اساس [۱۳-۱۵] بیانگر دمای تبلور بین ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد بوده و این گستره‌ی دمایی به روش ترسیمی [۱۷] نیز کاملاً تأیید شده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). از طرف دیگر، فشار تشکیل اوژیت-ها بر اساسِ [۱۳-۱۵] در گستره‌ی کمتر از ۸ کیلوبار قرار داشته و روش [۱۷] نیز فشار تشکیل کمتر از ۶ کیلوبار را برای آن‌ها نشان می‌دهد که با توجه به همپوشانی میان این گستره‌ها می‌توان فشار کمتر از ۶ کیلوبار را برای تشکیل آن‌ها در نظر گرفت. از آنجا که پلاژیوکلاز و اوژیت کانی‌های اصلی بازالت‌های منطقه را تشکیل داده و روابط بافتی و حضور فراوان بافت ساب افیتیک در آن‌ها حاکی از همپوشانی وسیع در بازه‌ی زمانی رشد این دو کانی روی منحنی کوتکتیک است، می‌توان تبلور پلاژیوکلازها را نیز در فشارهایی مشابه با اوژیت‌ها دانست. همچنین با فرض چگالی ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب (یعنی چگالی متوسط پوسته‌ی فوقانی و میانی، در [۱۴])، می‌توان با توجه به رابطه‌ی بین عمق و فشار [۱۴]، عمق تبلورِ ماگما را در آشیانه/آشیانه‌های ماگمایی واقع در اعماق کمتر از حدود ۲۳ کیلومتر دانست.

یکی از ویژگی‌های مجموعه‌ی بازالتی سلطان میدان، حضور سنگ‌های اسیدی به صورت قطعات درشت گرانیتی در میان لایه‌های کنگلومرایی موجود در آن است. بررسی‌های مختلف حاکی از جایگیری توده‌ی نفوذی اولیه‌ی این گرانیت‌ها همزمان با تشکیل مجموعه‌ی بازالتی سلطان میدان است [۱، ۲، ۱۸]. بر این اساس، بازه‌ی زمانی کوتاه بین انجماد ماگمای گرانیتی در عمق زمین تا بالازدگی، فرسایش و شرکت قطعاتِ درشت آن در کنگلومرای مزبور در ارتباط با جایگیری سریع توده‌ی نفوذی گرانیتی در اعماق نسبتاً کم و برخاستگی شدید منطقه‌ی مورد بررسی در این زمان، در نظر گرفته شد [۱].

به طور کلی تشکیل ماگمای اسیدی در حاشیه‌های کافتی می‌تواند در نتیجه‌ی دو سازوکار اصلی، شامل شکل‌گیری ماگمای بازالتی در آشیانه‌ی ماگمایی و یا ذوب ترکیبات پوسته‌ای رخ دهد، ولی در بسیاری از حاشیه‌های کافتی، بدون اینکه هیچگونه ارتباط ژنتیکی و خویشاوندی بین ماگماتیسم بازی و اسیدی وجود داشته باشد، می‌توان این دو ماگماتیسم را همراه با یکدیگر مشاهده کرد. به‌طوری که به عقیده‌ی [۱۹] آشیانه‌های ماگمایی می‌توانند با ذوب مواد پوسته‌ای دارای نقشی محوری در شکل‌گیری ماگماهای اسیدی داشته باشند. به‌عنوان مثال، خاستگاه سنگ‌های آتشفشانی اسیدی در مناطقی نظیر اتندکا-پارانا (Etendeka-Parana) که همزمان با فعالیت بازالت‌های طغیانی ایجاد شده‌اند [۲۰]، در ارتباط با ذوب مواد پوسته‌ای در نظر گرفته شده است [۲۱].

ماهیت ماگمایی و نتایج بررسی‌های ژئوشیمیایی نشان داده که هیچگونه ارتباط ژنتیکی بین بازالت‌ها و گرانیت‌های منطقه-ی مورد بررسی وجود نداشته [۱] و سنگ‌های اسیدی حاصلِ شکل‌گیری و جدایی ماگمای بازی نیستند. بنابراین همزمانی در شکل‌گیری سنگ‌های گرانیتی در منطقه‌ی مورد بررسی با فوران بازالت‌های سلطان میدان می‌تواند دلیلی بر ایجاد این سنگ‌های اسیدی در نتیجه‌ی ذوب مواد پوسته‌ای باشد. از آنجا

که نتایج دما-فشارسنجی روی بازالت‌های منطقه حاکی از توقف و تبلور ماگمای اولیه در درون آشیانه/آشیانه‌های ماگمایی در اعماق کم پوسته است، تشکیل ماگمای گرانیتی را می‌توان با نفوذ و توقف ماگمای بازی در این اعماق وابسته دانست. در واقع توقفِ حجم‌های زیاد ماگمای داغ گوشته‌ای در اعماق کمِ پوسته، به همراه گرمای نهان تبلور ناشی از تبلور آن در آشیانه یا آشیانه‌های ماگمایی پوسته‌ای منجر به ذوب مواد پوسته‌ای و شکل‌گیری ماگمای گرانیتی در اعماق نسبتاً کم شده است. همچنین توده‌های گرانیتوئیدی غیرکوهزایی پالئوزوئیک زیرین ایران مرکزی نظیر بهاباد [۲۲] و البرز نظیر تویه‌دروار [۲۳] نیز نمونه‌هایی از این گرانیت‌ها هستند.

برداشت

ماگمای اولیه‌ی بازالت‌های سلطان میدان از ذوب بخشی ۱۴ تا ۲۰ درصدیِ خاستگاه گوشته‌ای غنی‌شده‌ی گارنت‌پریدوتیتی و در یک محیط کششی کافت درون قاره‌ای و در ارتباط با مراحل کافت‌زایی پالئوتتیس شکل گرفته و دارای ماهیت انتقالی تا قلیاییِ است. این بازالت‌ها از نظر سنگ‌نگاری دارای ترکیب نسبتاً یکنواختی بوده و پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن کانی‌های اصلی آن‌ها را تشکیل می‌دهند. کانی‌های فرعی در این بازالت‌ها شامل اکسیدهای مختلف آهن-تیتان بوده و در برخی از روانه‌ها الیوین نیز به صورت کانی فرعی حضور دارد. بر خلافِ کم بودن تنوع ترکیبی کانی‌های اولیه، کانی‌های ثانویه متنوع‌تر بوده و عموماً شامل کانی‌های کلریت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز، اسفن، رسی و اکسیدهای آهن هستند. نتایج دما-فشارسنجی بر روی کلینوپیروکسن‌ها حاکی از تبلور آن‌ها در دمای حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتیگراد و فشار کمتر از ۶ کیلوبار، و توقفِ ماگمای تشکیل دهنده‌ی بازالت‌های سلطان میدان در درون آشیانه/آشیانه‌های ماگمایی در اعماق کم پوسته (حدود کمتر از ۲۳ کیلومتر) است. به نظر می‌رسد که توقفِ ماگمای مافیک در چنین آشیانه/آشیانه‌های ماگمایی منجر به ذوبِ مواد پوسته‌ای و شکل‌گیریِ ماگمای گرانیتی در اعماق کمِ پوسته و ایجاد ماگماتیسم دوگانه (بایومودال) در منطقه‌ی مورد بررسی شده است.

قدردانی

نویسندگان مقاله از صندوق حمایت از پژوهشگران معاونت علمی ریاست جمهوری (INSF) (طرح پژوهشی شماره ۹۰۰۰۴۸۹۳) و دانشگاه شاهرود به خاطر حمایت‌های مادی و معنوی از انجام این پژوهش تشکر می‌کنند.

مراجع

[1] Derakhshi M., Ghasemi H., *"Soltan Maidan Complex (SMC) in the eastern Alborz structural zone, northern Iran: magmatic evidence for Paleotethys development"*, Arabian Journal of Geosciences (2013) DOI 10.1007/s12517-013-1180-2.

[۲] درخشی م.، قاسمی ح.، *"ماگماتیسم اردوویسین- دونین در شمال شاهرود: شاهدی بر کافت‌زایی طولانی مدت پالئوتتیس در البرز شرقی"*، مجله پترولوژی، دانشگاه اصفهان، زیر چاپ.

[3] Jenny J., *"Géologie et stratigraphie de Elburz oriental entre Aliabad et Shahrud, Iran"*, PhD thesis, Université de Genève (1977) 238p.

[4] Alavi M., *"Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in Northern Iran"*, Journal of Geodynamics 21(1996) 1-33.

[۵] جعفریان م.ر.، *"پترولوژی و ژئوشیمی ماگماتیسم مافیک پالئوزوئیک زیرین در البرز شرقی، ناحیه شاهرود- خوش ییلاق"*، پایان نامه دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات (۱۳۸۸) ۲۹۵ صفحه.

[۶] سهامی ط.، *"زمین‌شناسی و پتروژنز بازالت سلطان میدان در مناطق نکارمن و ابرسج، شمال شاهرود"*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، (۱۳۹۰) ۱۵۱ صفحه.

[۷] درخشی م.، قاسمی ح.، سهامی ط.، *"مقایسه ماگماتیسم شدید سیلورین ایران مرکزی و البرز در نواحی شیرگشت و سلطان میدان"*، پانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران (۱۳۹۰).

[۸] قاسمی ح.، کاظمی ز.، *"محیط زمین‌ساختی و ویژگی‌های خاستگاه سنگ‌های آذرین سازند ابرسج (اردوویسین فوقانی)، البرز شرقی، شمال شاهرود"*، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۹۲) ص ۳۷۰-۳۴۷.

[۹] قاسمی ح.، دیهیمی م.، *"ماگماتیسم بازیک قلیایی دونین در البرز شرقی، شمال شاهرود: شاهدی بر کافت‌زایی پالئوتتیس"*، فصلنامه زمین شناسی ایران، زیر چاپ.

[10] Morimoto N., *"Nomenclature of pyroxenes"*, Fortschr mineral 66 (1988) 237-252.

[11] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., *"An introduction to the rock-forming minerals"*,

Longman Scientific Technical, New York (1992) 528 p.

[12] Butler R.F., *"Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes"*, Blackwell Scientific Publications, Boston, (1992) 319 p.

[13] Putirka K., Johnson M., Kinzler R., Walker D., *"Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0-30 kbar"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 123 (1996) 92-108.

[14] Putirka K., Ryerson F.J., Mikaelian H., *"New igneous thermobarometers for mafic and evolved lava compositions, based on clinopyroxene + liquid equilibria"*. American Mineralogist 88 (2003) 1542-1554.

[15] Putirka K., *"Thermometers and Barometers for Volcanic Systems"*, Reviews in Mineralogy and Geochemistry 69 (2008) 61-120.

[16] Nimis P., Taylor W.R., *"Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part 1 Calibration and testing of a Cr-in-cpx barometer and an enstatite-in-cpx thermometer"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 139 (2000) 541-554.

[17] Soesoo A., *"A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: empirical coordinates for the crystallisation PT-estimations"*, Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen) 119 (1997) 55-60.

[18] Ghavidel-Syooki M., Hassanzadeh J.,Vecoli M.,*"Palynology and isotope geochronology of the Upper Ordovician–Silurian successions (Ghelli and Soltan Maidan Formations) in the Khoshyeilagh area, eastern Alborz Range, northern Iran; stratigraphic and palaeogeographic implications"*, Review of Palaeobotany and Palynology 164 (2011) 251-271.

[19] Cox K.G., *"A model for flood basalt volcanism",* Journal of Petrology 21(1980) 629-650.

[20] Peate D., *"The Paraná-Etendeka Province" in Mahoney, J., and Coffin, M.F, eds., "Large igneous provinces: Continental oceanic and planetary flood volcanism",* American Geophysical Union Geophysical Monograph 100 (1997) 217-245.

[21] Menzies M., Klemperer S.L., Ebinger C.J., Baker j., *"Characteristics of volcanic rifted margins"*, Geological Society of America Special Paper 362 (2002) 1-14.

[۲۲] بلاغی ز.، صادقیان م.، قاسمی ح.، *"پتروژنز سنگ‌های آذرین پالئوزوئیک زیرین جنوب بهاباد (بافق، ایران مرکزی): شاهدی بر ریفت‌زایی"*، مجله پترولوژی، دانشگاه اصفهان، شماره ۴ (۱۳۸۹) ص ۶۴-۴۵.

[۲۳] قاسمی ح.، خانعلی‌زاده ع.، *"گرانیتوئید نوع A تویه‌دروار، جنوب‌غرب دامغان: نشانه‌ای از ماگماتیسم محیط کششی پالئوزوئیک زیرین (پالئوتتیس) البرز"*، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۱ (۱۳۹۱) ص ۲۴-۳.